بررسی شرایط بهینه لحیم‌کاری غیرهمجنس تیتانیوم خالص تجاری به فولاد زنگ نزن ۳۰٤ کم‌کربن با استفاده از پرکننده پایه نقره BAg-8*

پژمان صارمی[۱]   مسعود کثیری[۲]

چکیده

با توجه به ویژگی‌های منحصربفرد تیتانیوم نظیرخواص مکانیکی و مقاومت به خوردگی عالی و کاربرد روزافزون آن در صنایع مختلف، امروزه اتصال این دسته از آلیاژها به دیگر مواد و بخصوص فولادها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. طبق دیاگرام فازی دوتایی Fe-Ti، این دو عنصر در یکدیگر حلالیت کامل ندارند؛ از این رو اتصال این دو آلیاژ با روش‌های جوشکاری ذوبی بسیار مشکل می‌باشد. لحیم‌کاری سخت یکی از بهترین روش‌ها برای اتصال آلیاژهای غیرمشابه می‌باشد. در این تحقیق خواص متالورژیکی و مکانیکی لحیم‌کاری سخت اتصال لب روی لب فولاد به تیتانیوم توسط فلزات پرکننده‌ی تجاری BAg-8 در محدوده‌ی زمانی و دمایی مختلف بررسی شد. بررسی ریزساختار فصل مشترک مشخص می‌کند شکل‌گیری لایه‌های شیمیایی نزدیک به قسمت تیتانیوم رخ می‌دهد در حالیکه در سمت فولاد هیچ لایه شیمیایی با آلیاژ لحیم‌کاری نقره وجود ندارد. ساختار درشت دانه در مرز فولاد با آلیاژ لحیم‌کاری نقره شکل می‌گیرد. این ساختار حاصل از رشد نفوذی همراه با تبلور مجدد زیر لایه فولاد در دمای بالاست. همچنین بررسی‌های انجام شده توسط میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی و انجام آزمایش مکانیکی برش نشان می‌دهد که با افزایش دما و همچنین زمان لحیم‌کاری، به دلیل افزایش ضخامت لایه میانی، استحکام برشی میانگین کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی تیتانیوم خالص تجاری، فولاد زنگ نزن ۳۰٤ کم‌کربن، لحیم‌کاری سخت، ریزساختار، خواص مکانیکی.

Optimum Brazing Conditions for Joining Commercially Pure Titanium to 304L Stainless Steel using BAg-8 Silver Filler Metal

P. Saremi   M. Kasiri

Abstract

Joining of titanium alloys to other materials especially steels has attracted much attention in recent years due to the exceptional properties of titanium such as excellent corrosion resistance and mechanical properties and its increasing application in various industries. According to the Fe-Ti binary phase diagram, these two elements do not have complete solubility. This leads to difficulties during fusion welding of these two alloy. One of the best methods for joining dissimilar alloys is brazing. In this research, the metallurgical and mechanical properties of brazing lap joints of steel to commercially pure titanium using a commercial filler metal (BAg-8) made under different time and temperature conditions were investigated. The study of the microstructure interface shows the formation of a chemical layer close to the titanium side of the joint, while no chemical compounds were created on the steel side. A coarse structure is formed at the interface between the steel and silver solder alloy. The observed coarse grain structure is related to the grain growth along with recrystallization in the steel substrate at high temperatures. Analysis of the joints was carried out by optical microscopy, scanning electron microscopy, X-ray diffraction and hardness measurements. The results show that with increasing temperature, as well as brazing time, the average shear strength decreases due to the increased thickness of the intermediate layer.

Keywords Commercially Pure Titanium; Stainless Steel 304L; Brazing, Microstructure; Mechanical Properties.

---

* نسخهٔ نخست مقاله در تاریخ ۹۳/۱/۱٦ و نسخه ی پایانی آن در تاریخ ۹۳/۷/۲۰ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده مسئول: کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد. Pezhman_saremi@yahoo.com

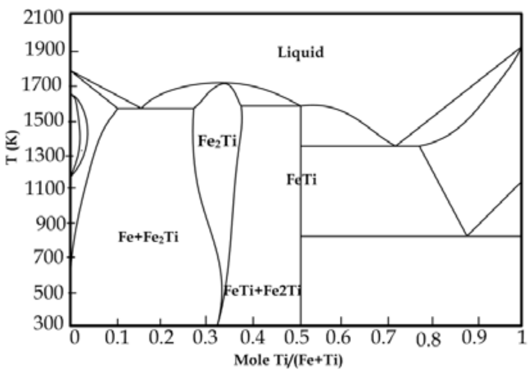
(۲) استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد.

DOI: 10.22067/ma.v28i1.33734

مقدمه

با توجه به خواص بسیار مناسب تیتانیوم این دسته از مواد کاربرد بسیار وسیع ومتنوعی پیدا کرده اند. از جمله این کاربردها میتوان به صنایع هوافضا، پزشکی، تسلیحات، صنایع شیمیایی و... اشاره نمود . [1,2]این کاربرد روزافزون باعث شده که اتصال تیتانیوم به سایر مواد بسیار مورد توجه قرار گیرد[3,4].

سه روش عمده که برای اتصال تیتانیوم وآلیاژهای آن بکار می‌رود، شامل جوشکاری ذوبی، اتصال نفوذی و لحیم‌کاری سخت می‌باشد، هرچند اخیراً اتصال تیتانیوم توسط روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی مورد توجه قرار گرفته است [5]. طبق شکل (۱) دیاگرام فازی آهن– تیتانیوم، این دو عنصر در یکدیگر حلالیت کامل ندارند؛ از این رو اتصال این دو آلیاژ با روش‌های جوشکاری ذوبی بسیار مشکل می‌باشد.



شکل ۱ دیاگرام فازی آهن–تیتانیوم

علی رغم بعضی از مزایای دو روش اول، لحیم-کاری سخت در مقایسه با دو روش دارای محاسنی می-باشد تا این روش به عنوان یکی از روش‌های اصلی مطرح شود. از جمله این مزایا می‌توان به مواردی مانند کاهش فازهای ترد در محل اتصال و کاهش تنش‌های پسماند در قطعه و همچنین کاهش دما و زمان لحیم کاری و عدم نیاز به فشار اعمالی اشاره نمود[1].

یکی از نکاتی که باید مورد توجه قرار بگیرد چگونگی بوجود آمدن فازهای ترد در محل اتصال می‌باشد. این نکته از آن جهت حائز اهمیت است که فازهای ترد ایجاد شده در محل اتصال می‌تواند از نقطه نظر کاربردی و سرویس‌دهی بسیار مهم باشد[3].

ارزیابی ریزساختار و واکنش‌های انجام شده در محل اتصال در مورد اتصال فولاد زنگ نزن 304L و تیتانیوم خالص تجاری گرید ۲ توسط فلز پرکننده پایه نقره‌ی Ag–۵Cu–۱Al–۱/۲۵Ti به روش لحیم‌کاری تحت خلا، نشان دهنده‌ی تشکیل یک لایه محلول جامد فقیر شده از نیکل و ترکیب غیر پیوسته $(Ni,Fe)_2TiAl$ در نزدیکی سطح فولاد و سه لایه پیوسته موازی از ترکیبات CuTi، AgTi و $(Ag,Cu)Ti_2$ در نزدیکی سمت تیتانیوم می‌باشد. همچنین در مطالعه شکست ناشی از آزمایش خمش، ملاحظه شده است که محل شکست از لایه ی $(Ag,Cu)Ti_2$ آغاز شده است [6].

همچنین مطالعه ساختاری اتصال لحیم سخت تیتانیوم (TC4) حاوی آلومینیوم و وانادیوم با فولاد زنگ نزن (1Cr 18Ni 9Ti) با استفاده از فلز پرکننده AgCuTi حاکی از آن است که فازهای شکل گرفته از طرف تیتانیوم به طرف فولاد در دمای ۹۲۰ درجه سانتیگراد به صورت زیر می باشد:

$$1Cr18Ni9Ti/CuTi/Ag\text{-}rich+Cu_4Ti/\beta\text{-}Ti/TC4$$

با بررسی استحکام برشی، محل شکست در ناحیه غنی از نقره و به صورت شکست نرم می‌باشد. این در حالیست که اتصال در دمای ۹۸۰ درجه سانتیگراد ساختار زیر را داراست:

$$1Cr18Ni9Ti/Ag\text{-}rich/CuTi_2/Ti\text{-}Cu\text{-}rich/\beta\text{-}Ti/TC4$$

که در این دما محل شکست در $CuTi_2$ و Ti-Cu-rich به یک میزان می‌باشد[7].

بررسی اتصال تیتانیوم خالص تجاری به فولاد کم کربن با استفاده از فلزات پرکننده متنوع پایه نقره و پایه مس نیز حاکی از آن است که استحکام برشی به شدت تابع پهنای لب روی لب اتصال می‌باشد. ملاحظه شد که با تغییر فلز پرکننده، مسیر شکست و استحکام برشی تغییر می‌کند. ترکیبات بین فلزی بوجود آمده با استفاده

از فلز پرکننده پایه نقره $TiCu$، Cu_2Ti و $FeTi$ گزارش شده است. ملاحظات حاکی از آن است که استفاده از فلز پرکننده پایه نقره بین تیتانیوم و نقره ترکیبات $CuTi$ در دمای پایین و $CuTi$ و Ti_2Cu در دمای بالا تشکیل و محل شکست در آزمایش استحکام کششی از این محل می‌باشد در حالیکه با استفاده از فلز پرکننده پایه مس محل شکست نزدیک به سمت فولاد در جایی که ترکیبات $FeTi$ تشکیل شده می‌باشد[8].

در این تحقیق اتصال تیتانیوم خالص تجاری به فولاد کم کربن توسط فلز پرکننده تجاری BAg-8 مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین سعی شده تا تاثیر عوامل موثر بر روی چگونگی فازهای به وجود آمده در محل اتصال و شرایط بهینه لحیم کاری بررسی گردد.

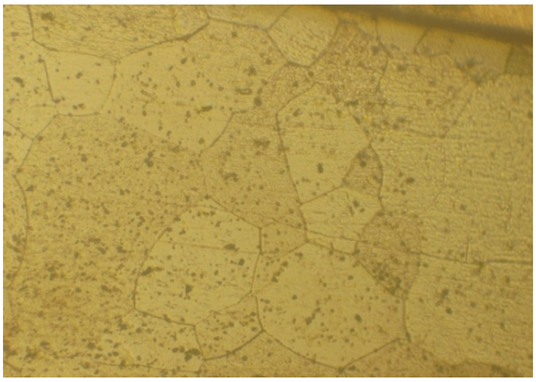
مواد وروش تحقیق

فلزات پایه مصرفی. در این تحقیق برای اتصال دهی به روش لحیم‌کاری سخت از فولاد زنگ نزن آستنیتی کم کربن AISI 304L و تیتانیوم خالص تجاری استفاده شده است. انتخاب فولاد زنگ نزن ۳۰٤ به صورت کم کربن به دلیل کاهش ترکیبات بین فلزی می‌باشد چراکه این ترکیبات به شدت سبب افت خواص مکانیکی اتصال خواهد شد.

فولاد زنگ نزنAISI 304L. فولاد زنگ نزن آستنیتی AISI 304L یکی از فولادهای عملیات حرارتی ناپذیر دارای عناصر آلیاژی کروم و نیکل است که مقاومت خوبی در مقابل خوردگی از خود نشان می‌دهد. این فولاد اصلاح شده‌ی نوع ۳۰٤ با حداقل کربن برای محدودیت بیشتر تشکیل رسوب در حین جوشکاری، در مخزن‌های سموم و کودهای شیمیایی مایع و همچنین قوطی‌های کنسرو بکار می‌رود. در این آلیاژ میزان حداکثر کربن مجاز بر حسب درصد وزنی ۰٫۰۳٪ بوده به طوری که برای کار در دماهای کمتر از ٤۲۵ درجه سانتیگراد به کار می‌رود. جدول (۱) و شکل (۲) درصد ترکیب شیمیایی، خواص مکانیکی و ریزساختار فولاد مورد استفاده را در دمای اتاق نشان می‌دهد. همان طور که در شکل (۲) مشخص است، ریزساختار فولاد مورد استفاده به علت داشتن نیکل که پایدارکننده آستنیت می‌باشد در دمای اتاق شامل دانه‌های آستنیتی هم محور است که یک ساختار FCC می‌باشد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی وخواص مکانیکی فولاد زنگ نزن AISI 304L

خواص مکانیکی		ترکیب	عنصر	ترکیب	عنصر
267Mpa	YS	0.4	Si	Balance	Fe
		0.04	P	17.7	Cr
562Mpa	UTS	0.005	S	8.94	Ni
		0.03	C	0.81	Mn



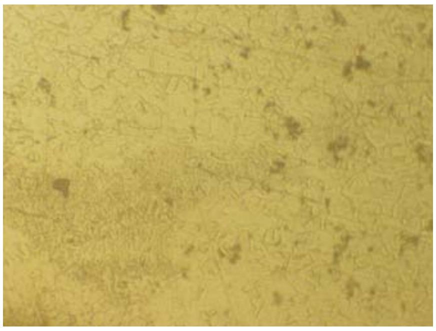
شکل ۲ ریزساختار فولاد زنگ نزن ۳۰٤ کم‌کربن توسط میکروسکوپ نوری

تیتانیوم خالص تجاری. تیتانیوم خالص تجاری که به صورت آلیاژ در نیامده بین ۹۹ تا ۹۹/۵ درصد تیتانیوم دارد. عناصر ناخالصی اصلی در تیتانیوم غیرآلیاژی، شامل آهن و عناصر بین‌نشین کربن، اکسیژن، نیتروژن و هیدروژن می‌باشند. جدول (۲) و شکل (۳) ترکیب شیمیایی، خواص مکانیکی و ریزساختار تیتانیوم مورد استفاده‌ی این تحقیق را نشان می‌دهد.

همانطور که در شکل (۳) مشخص است ریزساختار تیتانیوم خالص تجاری شامل دانه‌های هم محور آلفا بوده که پس از کارسرد و تابکاری در دمای بیشتر از دمای تبلور مجدد بوجود می‌آید.

جدول ۲ ترکیب شیمیایی وخواص مکانیکی تیتانیوم خالص تجاری

خواص مکانیکی		ترکیب	عنصر	ترکیب	عنصر
240 Mpa	YS	0.03	N	0.014	H
		0.18	Fe	0.07	C
329 Mpa	UTS	Balance	Ti	0.16	O



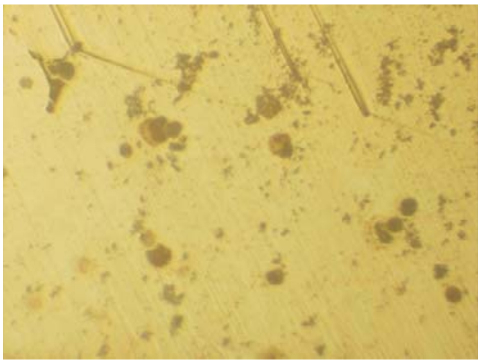
شکل ۳ ریزساختار تیتانیوم خالص تجاری توسط میکروسکوپ نوری

آلیاژ پرکننده اتصال فیلر تجاری BAg-8. در این فرآیند اتصال‌دهی از فلز پرکننده پایه نقره بهره برده شده است. همانطور که بیان شد نقره عنصری است که قابلیت ایجاد محلول جامد را با بسیاری از عناصر داراست. فلزات پرکننده پایه نقره دارای تنوع وسیعی می‌باشند. از دلایل استفاده از این آلیاژ می‌توان به قابلیت ایجاد اتصالی با استحکام بالا اشاره نمود که دلیل این امر ترشوندگی مناسب سطوح فلزات پایه، نقطه ذوب پایین این فیلرها و... می‌باشد. از طرفی مقاومت به خوردگی بالای اتصال ایجاد شده توسط این فیلر از دیگر ویژگی‌های این دسته از فیلرها می‌باشد. در این تحقیق از ورقه تجاری آلیاژ پایه نقره با ترکیب Ag-28Cu با نام تجاری BAg-8 با ضخامت ۱۰۰ میکرون و عرض ۲۸ میلیمتر بصورت فویل نورد شده بهره گرفته شد. جدول (۳) و شکل (٤) عناصر شیمیایی فیلر BAg-8، مشخصات و ریزساختار نوری را نشان می‌دهد.

گاز آرگون مصرفی. در این فرآیند به منظور کاهش میزان اکسیژن در کوره از گاز خنثی آرگون استفاده شده است. اصولاً اتصالات کوره‌ای را برای مواد حساس به اکسیداسیون مثل آلیاژهای تیتانیوم در شرایط خلأ به کار می‌برند اما به دلیل اینکه فیلر مورد استفاده در این پروژه پایه نقره می‌باشد و حساسیت کمتری نسبت به اتمسفر کاری دارد و همچنین بدلیل هزینه زیاد و غیرصنعتی بودن کوره‌های تحت خلأ به گاز محافظ آرگون بسنده شده که میزان خلوص گاز در جدول ٤ آورده شده است.

جدول ۳ عناصر شیمیایی فیلر BAg-8 و ویژگی‌های آن

خواص مکانیکی	خواص حرارتی		ترکیب شیمیایی	
استحکام کششی UTS	Flow Point	Melting Point	%Cu	%Ag
٤٦٦ Mpa	۷۷۹°C	۷۷۹°C	۲۸	۷۲



شکل ٤ ریزساختار فیلر تجاری BAg-8 توسط میکروسکوپ نوری

جدول ٤ میزان خلوص گاز آرگون مورد استفاده

Argon	O_2	C_nH_m	H_2O	CO_2	N_2
%99.99	<0.2 PPm	<0.1 PPm	<3 PPm	<0.1 PPm	<5 PPm

کوره مورد استفاده. در این پروژه از کوره مافلی ساخت کمپانی اکسایتون با ورودی و خروجی گاز و واشرهای ایزوله کننده به همراه آبگرد خنک کننده واشرها، با تلرانس دمای ۲۰± درجه سانتیگراد استفاده شد.

آماده سازی نمونه‌ها و نگهدارنده جهت اتصال‌دهی. نمونه‌های هر دو ماده مورد اتصال به ابعاد (۲×۲۸×۱۲۵)

میلیمتر بوسیله برش گیوتین تهیه و مقطع مـورد اتصـال تحت سمباده زنی از ٦۰ تـا ۸۰۰ بوسـیله سـمباده قـرار گرفته شد تا سطح اتصال از هرگونه اکسید و ناخالصـی پاک شود. جهت چربی زدایی بـه مـدت ٢٤ سـاعت در حمام استون نگهداری شده و سپس جهت انجـام لحـیم کاری پس از قرارگیری بر روی نگهدارنـده درون کـوره قرار داده شد. به منظور امکان اتصال دو ماده مورد نظـر برای جفت و جور شدن و نگهداری صحیح قطعات در کوره، نگهدارنده‌ی مـورد نیـاز طراحـی و سـاخته شـد. همچنین جهت انجام عملیات لحیم‌کـاری فلـز پرکننـده مورد نظر در بین مواد پایه بر روی نگهدارنده قـرار داده شد و درون کوره قرار گرفت. عرض روی هم افتـادگی تیتانیوم و فولاد ٦ میلیمتر درنظر گرفته شد چراکه بـرای دستیابی به بالاترین استحکام پهنای لبه بایسـتی بـیش از سه برابر ضخامت لبه درنظرگرفته شود [۹]. بدلیل اینکه اتصال‌دهی در دمای بالا و چندین بار تکرار پـذیرفت و امکان پیچیـدگی ابعـادی در اثـر آزاد شـدن تـنش‌هـای پسـماند در نگهدارنـده وجـود داشـت از آجـر نسـوز متخلخل استفاده گردید که مقاومت خـوبی در دماهـای بالا از خود نشان می‌دهد. شکل شماتیک فیکسچر مورد استفاده در شکل (۵) مشخص مـی‌باشـد. لازم بـه ذکـر است که در این تحقیق از فلاکس استفاده نشد.



شکل ۵ فیکسچر ساخته شده برای انجام اتصال

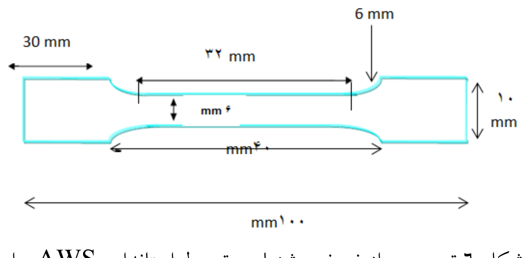
متالوگرافی نمونه هـا، میکروسـکوپ الکترونـی روبشی و دستگاه سنجش اسـتحکام برشـی . بعـد از عملیات اتصال دهـی در دمـا و زمـان هـای مختلـف و همچنین عملیات همگن‌سازی، فـیلم رادیـوگرافی تهیـه شده از کلیه نمونه ها، مـورد بازرسـی قـرار گرفـت. در نهایت نمونه های بدون عیب بـرای آزمـایش اسـتحکام برشی و نمونه ای دیگر بـرای انجـام متـالوگرافی درون مانت گرم قرار داده شد. به روش الکترواچ با ولتاژ معین و با محلول اچ انتخابی مورد نظر که در جدول (۵) ارایه شده عملیات متالوگرافی تکمیل گردیده است[۱۰].

جدول۵ شرایط الکترواچ نمونه‌ها

Type	%HF	$\%HNO_3$	درصد گلیسرین
CP Ti	۵	۲۰	۷۵
AISI 304L	محلول نایتال ۳٪		

بعد از عملیات متالوگرافی، نمونه ها برای بررسـی ریزساختاری دقیقتر تحت آزمایش آنالیز عنصری توسط میکروسکوپ االکترونی مدل Vega II سـاخت کمپـانی Tescan و آنالیز عنصـری توسـط مـدلINCA سـاخت کمپانی Oxford Instrument قرار گرفتند. لازم بـه ذکـر است که این دستگاه از نسل جدید می‌باشـد و EDS آن دارای توانایی قابل قبولی در آنـالیز عناصـر سـبک مثـل کربن و بور می‌باشد.

همچنین به منظور به دست آمدن میزان استحکام برشی، نمونه های اتصال یافته رادیوگرافی شده بی عیب در ابتدا بر اساس استاندارد AWSC3.1-63 طبق شکل (٦) توسط دستگاه وایرکات آماده وسپس تحت آزمون قرار گرفتند. نکته قابل ذکر در مورد سطح شکست نمونه ها اینکه در حین عملیات لحیم کاری ممکن است قسمت‌هایی از اتصال با مذاب کاملاً پر نشده باشد یا در حین لحیم کاری دچار تخلخل شده باشد، به همین منظور بعد از اتمام آزمایش مساحت مفید مقطع شکست به وسیله ی صفحه شطرنجی با بزرگنمایی ٤ برابر، اندازه گیری شده و استحکام برشی برحسب مگاپاسکال محاسبه گردیده است.

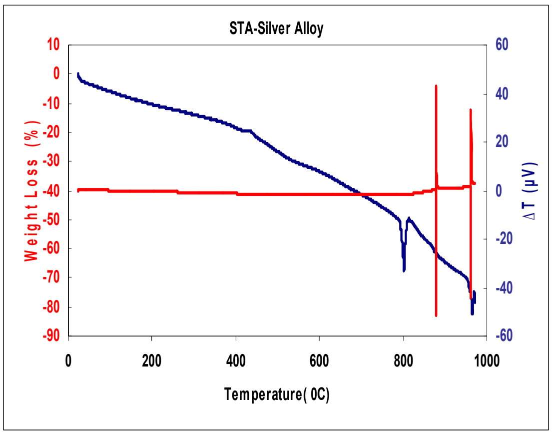


شکل ٦ تصویری از نمونه پیشنهادی توسط استاندارد AWS برای انجام آزمایش استحکام برشی

نتایج وبحث

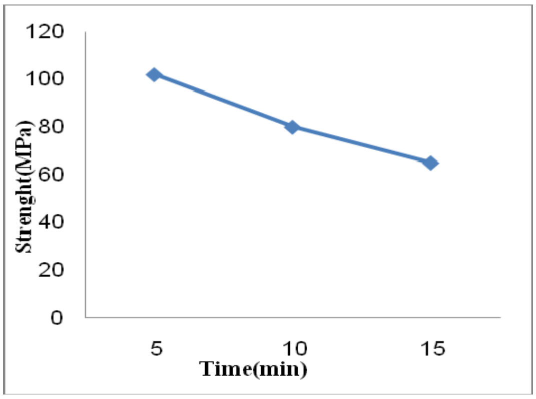
تعیین دما وزمان بهینه لحیم کاری اتصال تیتانیوم به فولاد توسط فیلر BAg-8. همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود دمای ذوب و جاری شدن فیلر مورد استفاده در استاندارد در حدود ۷۸۰ درجه سانتیگراد معرفی شده است. برای حصول اطمینان از درجه حرارت ذوب فیلر مورد استفاده آزمایش آنالیز حرارتی تفاضلی گرفته شد که در موارد مشابه نیز از این آزمایش استفاده شده است[4,11].

شکل (۷) نتیجه آزمایش آنالیز حرارتی تفاضلی گرفته شده را از فیلر مورد استفاده نشان می دهد.

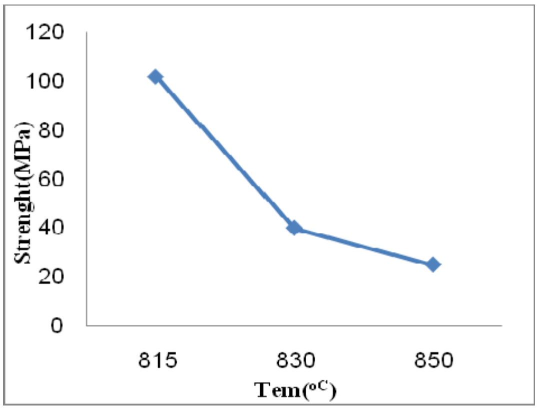


شکل ۷ نمودار DTA و تعیین دمای دقیق ذوب فیلر

با توجه به نمودار درجه حرارت ذوب فیلر در حدود ۸۰۳ درجه سانتیگراد می باشد که برای سیالیت مناسب بعنوان شروع کار درجه حرارت لحیم کاری را در حدود ۱۰ درجه بالاتر انتخاب شد. برای تعیین دمای بهینه در ۳ درجه حرارت ۸۱۵، ۸۳۰ و ۸۵۰ درجه سانتیگراد لحیم‌کاری انجام گردید. نتایج آزمایش استحکام برشی حاکی از آن است که اتصال لحیم کاری شده در دمای ۸۱۵ درجه سانتیگراد و در مدت زمان ۵ دقیقه بالاترین استحکام را با استحکامی حدود ۱۰۲ مگاپاسکال از خود نشان داد درحالیکه میزان استحکام برشی اتصال در دماهای ۸۳۰ و ۸۵۰ درجه سانتیگراد در همان مدت زمان لحیم‌کاری در حدود ۴۰ و ۲۵ مگاپاسکال بود. همچنین برای تعیین زمان بهینه لحیم کاری در درجه حرارت بهینه ۸۱۵ درجه سانتیگراد در سه زمان نگهداری ۵، ۱۰ و۱۵ دقیقه لحیم کاری انجام شد. نتایج آزمایش استحکام برشی بیانگر این امر است که اتصال لحیم کاری شده در دمای ۸۱۵ درجه سانتیگراد بالاترین استحکام را از خود نشان داد درحالی که میزان استحکام برشی اتصال در زمان‌های ۱۰ و ۱۵ دقیقه در حدود ۸۰ و ٦۵ مگاپاسکال بود. شکل‌های (۸ و ۹) تاثیر پارامترهای دما و زمان را بر میزان استحکام برشی بیان می‌کند.



شکل ۸ تاثیر پارامتر زمان بر استحکام اتصال لحیم‌کاری شده توسط فیلر تجاری BAg-8



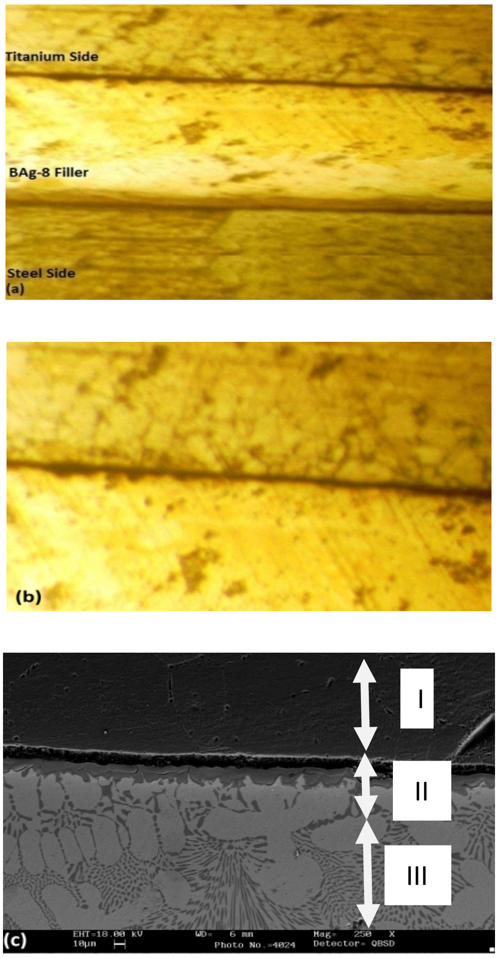
شکل ۹ تاثیر پارامتر دما بر استحکام اتصال لحیم‌کاری شده توسط فیلر تجاری BAg-8

مشاهدات ریزساختار اتصال تیتانیوم به فولاد توسط فیلر BAg-8 در دمای ۸۱۵ درجه سانتیگراد و زمان نگهداری ۵ دقیقه. همانگونه که در شکل (۱۰ و۱۱) مشخص است و با توجه به تفسیر EDS جدول (٦) ساختار درز اتصال به صورت کلی شامل یک سری از

فازهایی می‌باشد که متفاوت از ترکیب فلز پرکننده اولیه هستند. این امر نشان دهنده این حقیقت است که فلز پرکننده به طور کامل با سطح نمونه ها واکنش داده است. هرچند به نظر می‌رسد عمده واکنش در درز اتصال بین تیتانیوم و فلز پرکننده است. با توجه به شکل افزایش دما وزمان لحیم کاری، بر مقدار فازهای میانی تشکیل شده در درز اتصال افزوده است. که این امر با توجه به واکنش هرچه بیشتر بین فیلر و تیتانیوم قابل توجیه می‌باشد. همچنین در زمان‌های کم فاز پیشنهادی Cu_2Ti تنها در مجاورت سطح تیتانیوم تشکیل شده است در حالیکه با افزایش زمان این فاز در مرکز درز اتصال نیز تشکیل شده است. این امر با توجه به حل شدن تیتانیوم در فلز پرکننده و افزایش فاصله نفوذی تیتانیوم با افزایش زمان قابل توجیه می باشد.

بررسی ریز ساختار با توجه به تفسیر EDS جدول (٦) مشخص می‌کند شکل‌گیری لایه‌های شیمیایی بیشتر نزدیک به قسمت تیتانیوم رخ می دهد در حالیکه در سمت فولاد هیچ لایه شیمیایی با آلیاژ لحیم کاری نقره مشاهده نمی گردد. ساختار درشت دانه در مرز فولاد با آلیاژ لحیم کاری نقره شکل می‌گیرد. این ساختار حاصل از رشد نفوذی همراه با تبلور مجدد زیر لایه فولاد در دمای بالاست. شکل (۱۰) مشخصات ریزساختار لحیم کاری تیتانیوم به فولاد در دمای ۸۱۵ درجه سانتیگراد به مدت ۵ دقیقه را نشان می‌دهد.

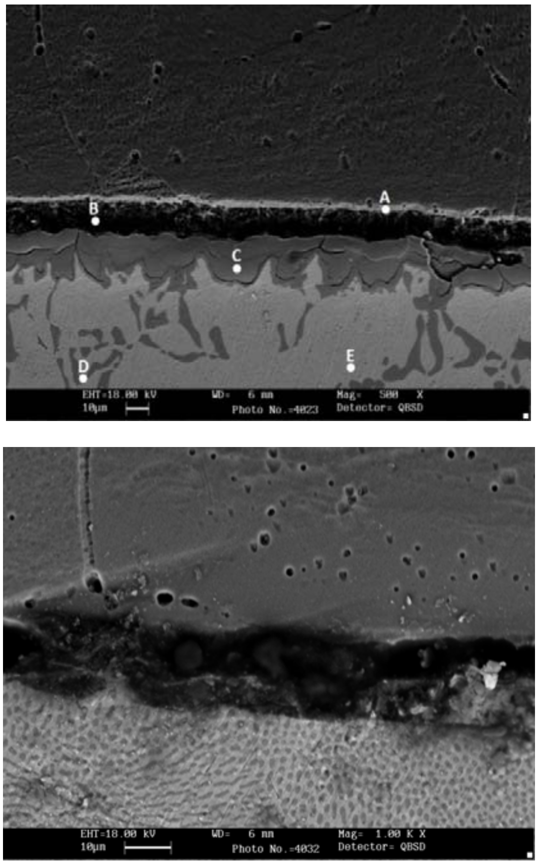
شکل (۱۰ب و ۱۰ث) مورد نمایی از ریزساختار میانی اتصال تیتانیوم/آلیاژ پرکننده را با میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی نشان می‌دهد. همانطور که در شکل مشخص است، ناحیه میانی شامل سه منطقه مجزا است. منطقه اول فلز پایه تیتانیوم بدون وجود نفوذ عناصر آلیاژ لحیم کاری است. منطقه دوم که بنظر می-رسد منطقه میانی و نفوذی باشد بطوریکه مقادیر بالای تیتانیوم از سمت تیتانیوم به ناحیه لحیم کاری نزدیک به تیتانیوم نفوذ کرده‌اند. واضح است که منطقه دوم از حداقل ۳ نوع لایه شیمیایی پیوسته تشکیل شده است. تفسیر EDS بیان می دارد که لایه های میانی عمدتاً حاوی مس و تیتانیوم هستند. بنابر دیاگرام فازی دوتایی Cu-Ti، تناسب اتمی نسبی این عناصر به TiCu، Ti_2Cu و Cu_2Ti با مقادیر مازاد نقره نزدیک است که این امر در بررسی‌های مشابه نیز مشاهده گردیده است[12]. ضخامت متوسط اندازه‌گیری شده برای منطقه دوم حدود ۱۱/۲ میکرون می باشد که با افزایش زمان لحیم کاری با توجه به زمان مناسب برای نفوذ هرچه بیشتر وسعت وپهنای این منطقه بیشتر وتا حدود ۲۰ میکرون افزایش می یابد.



شکل ۱۰ الف) ریزساختار لحیم‌کاری اتصال تیتانیوم/فولاد در دمای ۸۱۵ درجه سانتیگراد به مدت ۵ دقیقه با پرکننده BAg-8، ب) نمای ریزساختار میانی اتصال تیتانیوم/پرکننده با میکروسکوپ نوری، ث) نمای ریزساختار میانی اتصال تیتانیوم/پرکننده با میکروسکوپ الکترونی روبشی

منطقه سوم به نظر می رسد که مابقی پرکننده است که مستقیما با فلزات پایه در تعامل نبوده است. این منطقه حاوی سه فاز است. فاز یوتکتیکی Ag-Cu، فاز

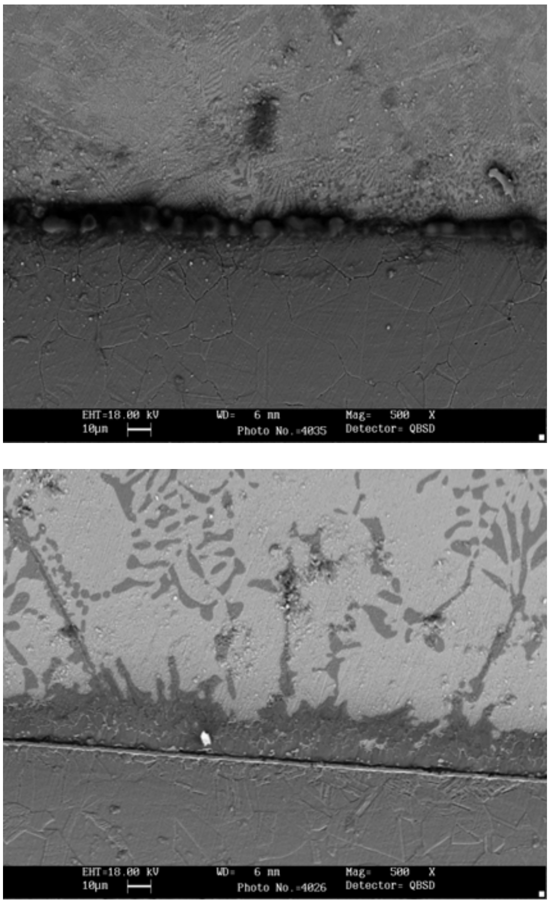
محلول جامد غنی از نقره که جهت مصرف مس توسط فازهای Cu-Ti در آلیاژ اصلی ایجاد شده اند و مقداری فاز پراکنده ی Cu_2Ti. این نتایج بر تحقیقات قبلی نیز منطبق است [۱۴،۱۳]. نتایج EDS در جدول (٦) مشخص می‌باشد. این جدول ترکیب شیمیایی نواحی علامتدار در شکل (۱۱) را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱ تصویر میکروسکوپی فصل مشترک تیتانیوم/آلیاژ پرکننده در دمای ۸۱۵ درجه سانتیگراد به مدت ۵ دقیقه، پایین بزرگنمایی ۱۰۰۰ و بالا بزرگنمایی ۵۰۰

جدول ٦ ترکیب شیمیایی نقاط مشخص شده در شکل (۱۱)

نقاط علامت زده شده در شکل ۱۱	%Ti	%Ag	%Cu	ساختار احتمالی
A	71.68	1.01	27.31	Ti_2Cu
B	48.43	4.79	46.78	CuTi
C	29.33	5.4	65.27	Cu_2Ti
D	3.83	66.97	29.2	یوتکتیک نقره-مس
E	1.02	94.12	4.86	Ag

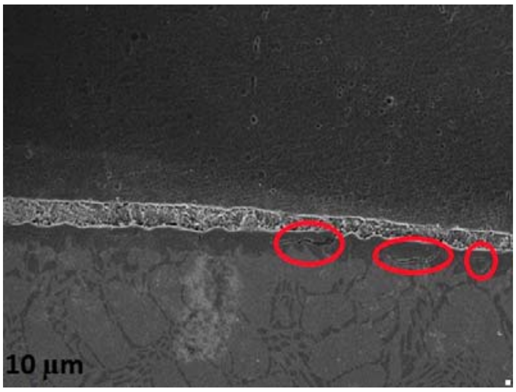


شکل ۱۲ تصویر میکروسکوپی فصل مشترک فولاد/آلیاژ پرکننده، پایین در دمای لحیم کاری ۸۱۵ درجه سانتیگراد به مدت ۵ دقیقه و بالا در دمای ۸۳۰ درجه سانتیگراد به مدت ۵ دقیقه

با توجه به جدول (٦) مشخص است که عمده فازهای تشکیل شده در درز اتصال فازهای میانی تیتانیوم و مس می باشد و مؤید این مطلب است که از عناصر تشکیل دهنده فلز پرکننده تنها عنصر مس با سطح تیتانیوم واکنش داده است و نقره در این واکنش ها تقریبا نقشی نداشته است که این امر در موارد مشابه نیز گزارش شده است. باید خاطرنشان کرد که افزایش دما بر میزان فازهای میانی تشکیل شده می افزاید. دلیل این امر افزایش سرعت انحلال تیتانیوم در فیلر و واکنش هرچه بیشتر مس با تیتانیوم می باشد.

استحکام برشی اتصال تیتانیوم به فولاد توسط فیلر BAg-8. نتایج آزمایش استحکام برشی حاکی از آن

است که افزایش دما و زمان لحیم‌کاری منجر به افت استحکام محل اتصال می‌شود. پس از انجام آزمایش استحکام برشی، اتصال لحیم کاری شده در دمای ۸۱۵ درجه سانتیگراد بالاترین استحکام را با استحکامی حدود ۱۰۲ مگاپاسکال از خود نشان داد درحالیکه میزان استحکام برشی اتصال در دماهای ۸۳۰ و ۸۵۰ درجه سانتیگراد در حدود ٤۰ و ۲۵ مگاپاسکال بود. با مطالعه سطح شکست مشخص می شود که شکست از محل اتصال رخ داده است که این امر کاملا طبیعی میباشد چراکه در مطالعه روش لحیم کاری سخت استحکام محل اتصال تا حدودی کمتر از فلزات پایه می باشد. بطور کلی استحکام برشی متوسط مشاهده شده برای این اتصال ٦۳ مگاپاسکال می باشد و همانگونه که در شکل مشخص می‌باشد، انواع ترک ها و بیشترین ساختار معیوب در این نواحی رخ داده است و شکست در لایه‌های میانی آلیاژ لحیم کاری تیتانیوم/نقره اتفاق می افتد. طبیعت ترد این شکست بیشتر به علت وجود فازهای Ti-Cu در محل اتصال است. شکل (۱۳) مورفولوژی و نحوه شکست را برای این اتصال نشان می‌دهد.



شکل ۱۳ مورفولوژی شکست اتصال تیتانیوم/ فولاد لحیم‌کاری شده در دمای ۸۱۵ درجه سانتیگراد به مدت ٥ دقیقه باپرکننده BAg-8

پس از بررسی‌های به عمل آمده، تیتانیوم خالص تجاری و فولاد زنگ نزن کم کربن به طور موفقیت آمیزی با استفاده از فلز پرکننده آلیاژ پایه نقره لحیم کاری شدند. زیر لایه تیتانیوم خالص تجاری با فلز مذاب لحیم کاری واکنش و لایه‌های واکنش مختلفی تشکیل می دهد. تیتانیوم α-β و فاز بین فلزی Ti-Cu فازهای اصلی شکل گرفته در ناحیه میانی فلزی تیتانیوم/پرکننده هستند. صرف نظر از نوع ترکیبات بین فلزی شکل گرفته در ناحیه میانی، وجود این لایه های نازک عمدتاً باعث افت خواص مکانیکی اتصال می شود چراکه معمولاً خواص فیزیکی نامرغوب و تافنس شکست پایینی دارند به طوری که این موضوع در مقالات مشابه نیز گزارش شده است [15,16]. علاوه بر طبیعت ترد فازهای بین فلزی شکل گرفته، پارامتر دیگری که بر کارکرد اتصال اثر دارد، ضخامت این فازها است. بطور کلی وقتی که ضخامت ترکیبات بین فلزی به قدرکافی بزرگ باشد ضعیف ترین ساختار را در اتصال ایجاد می کند به نحوی که شکست در این نواحی رخ می دهد. بنابراین یک ضخامت بحرانی برای این لایه وجود دارد تا به بالاترین استحکام برشی دست یابیم. به نحوی که اگر ضخامت ترکیبات بین فلزی ایجاد شده کمتر از مقدار بحرانی باشد شکست برشی در ناحیه ی اتصال ماده لحیم اتفاق می افتد و زمانی که ضخامت از مقدار بحرانی فراتر می رود، شکست به سمت فصل مشترک زیر لایه وترکیب بین فلزی میل می کند. این پدیده در مقالات مشابه نیز گزارش شده است [17].

پس به طور کلی به دلیل ترد بودن طبیعت ترکیبات بین فلزی، درحین کاربردهای تنش زا ترک در لایه ترکیب بین فلزی بوجود می آید و به راحتی داخل آن پیشرفت می‌کند. پیشرفت آسان ترک استحکام اتصال را کاهش می‌دهد و مورفولوژی شکست رفتار ترد از خود نشان می‌دهد. در مقابل وقتی ترک در لحیم بوجود می‌آید، پیشرفت بعلت انباشتگی تنش در ساختار داکتیل بسیار مشکل است. از این رو، این اتصالات استحکام بالایی نشان می‌دهند و شکست ویژگی‌های چقرمه دارد. بنابراین با کاستن ضخامت لایه‌های بین فلزی تا زیر مقدار بحرانی می‌توان از رشد ترک جلوگیری به عمل آورد واستحکام را تا حدود قابل ملاحظه ای افزایش داد. در این پژوهش لحیم کاری در مدت زمان ٥ دقیقه

در دمای ۸۱۵ درجه سانتیگراد کمترین ضخامت لایه‌ی ترکیبات بین فلزی و در نتیجه بالاترین استحکام را به دنبال داشت.

نتیجه گیری

۱) کاهش ضخامت ترکیبات بین فلزی شکل گرفته در ناحیه میانی، افزایش استحکام برشی اتصال را به دنبال دارد.

۲) افزایش دمای لحیم‌کاری منجر به افزایش ضخامت لایه بین فلزی ایجاد شده و در نتیجه کاهش استحکام می‌شود.

۳) افزایش زمان لحیم‌کاری نیز منجر به کاهش شدید استحکام ناشی از ایجاد ترکیبات بین فلزی می‌شود.

٤) با توجه به نتایج استخراج شده از آزمایش استحکام برشی بهترین مشخصات ساختاری و بالاترین استحکام، در زمان لحیم کاری ۵ دقیقه و دمای ۸۱۵ درجه سانتیگراد بود.

مراجع

1. He P., Feng J.C., Xu W., "Interfacial microstructure of induction brazed joints of TiAl-based intermetallics to steel 35CrMo with AgCuNiLi filler", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 408, pp. 195–201, (2005).
2. Ghosh M., Chatterjee S., Mishra B., "The effect of intermetallics on the strength properties of diffusion bonds formed between Ti–5.5Al–2.4V and 304 stainless steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 363, pp. 268–274, (2003).
3. Chan H.Y., Liaw D.W., Shiue R.K., "The microstructural observation of brazing Ti–6Al–4V and TZM using the BAg-8 braze alloy", *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, Vol. 22, pp. 27–33, (2004).
4. Elrefaey A., Tillmann W., "Microstructure and mechanical properties of brazed titanium/steel joints", *Journal of Material Science*, Vol. 42, pp. 9553–9558, (2007).
5. Lee W.B., Lee C.Y., Chang W.S., Mo Yeon Y.," Microstructural investigation of friction stir welded pure titanium", *Materials Letters*, Vol. 59, pp. 3315-3318, (2005).
6. Laik A., Shirzadi A.A., Tewari R., Kumar A., Jayakumar T., Dey G.K.," Microstructure and Interfacial Reactions During Active Metal Brazing of Stainless Steel to Titanium", The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International, (2013).
7. Yue X., He P., Feng J.C., Zhang J.H., Zhu F.Q., "Microstructure and interfacial reactions of vacuum brazing titanium alloy to stainless steel using an AgCuTi filler metal", *Journal of Materials Characterization*, pp. 1721–1727, (2008).
8. Elrefaey A., Tillmann W., "Brazing of titanium to steel with different filler metals: analysis and comparison", *Journal of Materials Science*, pp. 4332-4338, (2010).
9. Petzow G., Effenberg G., "Comprehensive compendium of evaluated constitutional data and phase diagrams", *Weinheim*, Germany, pp. 14-17, (1998).

10. Phillips V.A., "A metallographic study of precipitation in a Ni-12.7 at.% Al alloy" *Acta Metallurgica*, Vol. 14, No. 11, pp. 1533-1547, (1966).

11. Elrefaey A., Tillmann W., "Brazing temperature determines the microstructure and mechanical behavior of steel/titanium brazed joints", IBSC, Orlando, FL, pp. 2-5, (2009).

12. Baker H., "ASM handbook alloy phase diagrams", *ASM International, Materials Park*, OH, pp. 119-123, (1992).

13. Shiue R.K., Wu S.K., Li I.H.,"Infrared brazing of Fe3Al intermetallic compound using gold-based braze alloy", Gold Bull, pp. 49-56, (2011).

14. He P., Feng J.C., Xu W., "Microstructure and kinetics of induction brazing TiAl-based intermetallics to steel 35CrMo using AgCuTi filler metal", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 418, pp. 53-60, (2006).

15. Murakami T., Nakata K., Tong H., Ushio M.,"Dissimilar Metal Joining of Aluminum to Steel by MIG Arc Brazing Using Flux Cored Wire", *ISIJ International*, Vol. 43, No. 10, pp. 1596-1602, (2003).

16. Shiue R.K., Wu S.K., Shiue J.Y.," Infrared brazing of Ti–6Al–4V and 17-4 PH stainless steel with (Ni)/Cr barrier layer(s)" , *Materials Science & Engineering A*, Vol. 488, No. 1, pp. 186-194, (2008).

17. Shin C.K., Huh J.Y.," Effect of Cu-containing Solders on the Critical IMC Thickness for the Shear Strength of BGA Solder Joints", Third proceeding of EPTC, pp. 406–411, (2000).